

既設非合成桁橋梁のRC床版と主桁上フランジ間で 生じるせん断応力と実耐荷力評価

Evaluation of shear stress between RC slab and upper flange and loading capacity
of existing non-composite steel plate girder bridges

山田真幸*, 三木千壽**, 市川篤司***

YAMADA Masaki, MIKI Chitoshi, ICHIKAWA Atsushi

* 工博, 東北大学大学院助手, 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

** 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

*** 工博 研究開発推進室主査 財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

The non-composite plate girder bridge has no shear connectors between RC slab and upper flange. But practically, it behaves as the composite plate girder bridge because of adhesion and slab-anchors between RC slab and upper flange. In past one study, we carried out proof loading tests on two highway bridges and evaluate the live load response by FEM analysis and the conventional code. And we proposed an accurate FEM model that can be used in fatigue assessment and reinforcement work. In past another study, we carried out push out test and cyclic loading test to evaluate the shear strength of RC slab and upper flange. But the shear stress level in real bridges is not clear. So we tried to calculate the shear stress between RC slab and upper flange by accurate FEM model.

Key Words: shear stress, slab-on girder bridge, non-composite girder, RC slab, proof loading, shear connector, composite action

1. まえがき

わが国の道路橋で最も一般的な橋梁形式はRC床版非合成鋼プレートガーダー橋である。単純桁橋では合成桁の施工実績も増えているが、連続桁橋梁では、中間支点付近の負モーメントの処理、設計、施工が難しいことからほとんどが非合成桁として設計されている。

非合成鋼桁橋梁では地震時等に床版がずれ落ちるのを防止することを目的としたスラブアンカーが上フランジに取付けられているのみであり、設計上RC床版と上フランジとの橋軸方向の力の伝達は考えられてない。しかし多くの載荷試験による桁の応力分布や、床版と上フランジとのずれの観察等より、実際には床版と鋼桁とのずれは生じず合成桁の挙動を示すことが報告されている^{1)~6)}。また、その結果として活荷重応力は設計計算の60%程度しか生じていない事が示されている²⁾⁷⁾。すなわち、非合成桁橋梁は実際には活荷重に対して床版は上フランジ表面と床版の付着やスラブアンカーを介して桁と一体化し合成効果を発揮している合成構造⁸⁾⁹⁾といえる。この“非合成桁の合成効果”は設計時には考慮されていないことから非合成桁橋梁は設計値よりはるかに高い耐力を有して

いる可能性がある。そのため既存非合成桁橋梁はその設計荷重の改訂や死荷重の増加、交通量の増大に対してそのままの構造、あるいはミニマムな構造補強で十分に対応できる可能性があり、また、そのようなことが可能となれば経済的效果も大きいと考える。

筆者らのグループはこれまでも“非合成桁橋梁の合成効果”に着目して研究を進めてきた。文献 10) では2橋の既設非合成桁橋梁について載荷試験を行い、設計荷重を超えるレベルの荷重下でも合成桁橋梁として挙動していることを示した。またFEM解析と比較することより実応力と計算応力で差異が生じる要因を検討し、疲労照査、補強の検討等で用いることが可能なFEMモデルを提案した。次に文献 11) では既設非合成桁橋梁の合成効果を生み出している床版と主桁上フランジとの結合部分をモデル化し、静的載荷実験および疲労試験よりせん断抵抗の程度を明らかにした。しかしながらこの“非合成桁橋梁の合成効果”のキーとなる床版と主桁上フランジとの結合面で、実際にどの程度のせん断応力が発生しているかは明らかではない。

この実橋に生じているせん断応力の評価は既設非合成桁橋梁を合成桁橋梁として扱う際に不可欠である。そこ

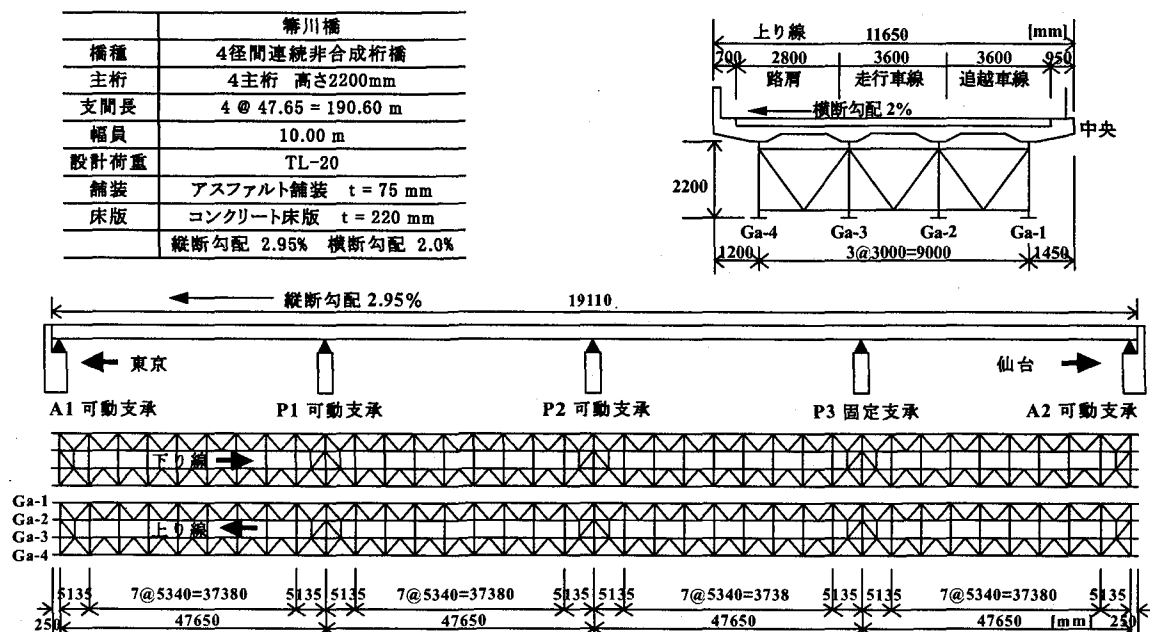


図-1 箒川橋の諸元

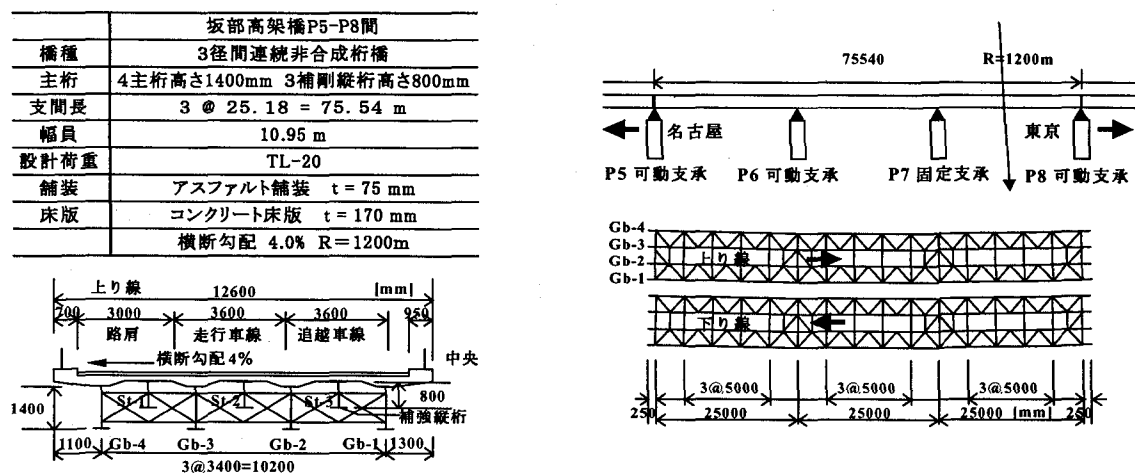


図-2 坂部高架橋の P5-P8 間の諸元

で本論文では2橋の既設非合成桁橋梁で床版と主桁上フランジ間で発生するせん断応力を評価し、加えて対象橋梁の現有する実耐荷力を評価することを試みる。

これらの評価では実際の応力分布と合うような解析モデルを用いることが必要であり、本研究では先に述べた文献 10) で作成したFEMモデルを用いる。ここで扱う載荷実験、解析モデルの構築、および直応力に対する検証については文献 10) を再構成したことをここに明記しておく。

2. 対象橋梁

本研究では東北自動車道箒川橋上り線および東名高速道路坂部高架橋上り線の2橋の既設非合成桁橋梁を対象とする。

これらの2既設非合成桁橋梁はともに改定以前のTL-20荷重¹²⁾により設計された非合成桁橋梁である。外観

および平面図、立面図、諸元を図-1、2に示す。

2.1 箒川橋

東北自動車道箒川橋は矢板IC、西那須野塩原IC間に位置し、高速道路橋としては一般的な2車線、RC床版非合成4径間連続4主桁橋である。主桁は中央側よりGa-1、Ga-2、Ga-3、Ga-4とする。支承はP3が固定支承であり、その他はラック・ピニオン式の可動支承である。これらは一般車両の通行にともない正常に機能していることが目視で確認できた。1973年に竣工し、主桁高さは2200mm、上フランジ上には16φ×600mm丸鋼のスラブアンカーが1000mm間隔に取付けられている。RC床版厚さは220mmでありアスファルト舗装厚さは75mmである。上フランジと対傾構を取付けた垂直ステイフナーとの溶接部に軽微な疲労亀裂が発見されているが、全体としては健全に機能している。また、RC床版は健全であり、ひび割れ、錆び汁の発生等の損傷は生じ



図-3 坂部高架橋の実橋荷重試験の様子

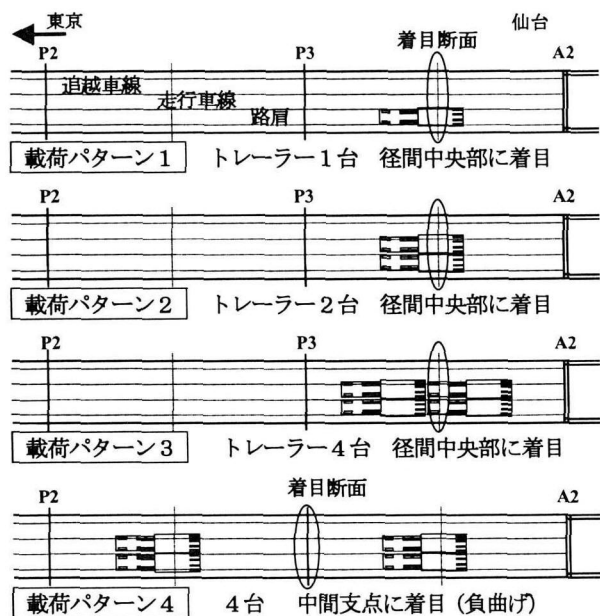


図-4 箒川橋荷重試験車両配置

ていない。

2. 2 坂部高架橋

東名高速道路坂部高架橋は相良牧之原 I C、吉田 I C 間に位置し、2 車線の 3 径間連続橋 9 連と 4 径間連続橋および 2 径間連続橋で構成された 3 3 径間の RC 床版非合成橋梁群である。本研究では上り車線の P5～P8 径間部の 3 径間連続橋に着目した。

1968年に竣工しているが、1980年に改良工事が行われており、各主桁の間に床版に対する補強対策として補強縦桁が取付けられている。4 主桁橋であり、桁は補強縦桁も含めて中央側より Gb-1、St1、Gb-2、St2、Gb-3、St3、Gb-4 とする。主桁高さは 1400mm であり、箒川橋と同様に上フランジ上には 16φ×600mm 丸鋼のスラブアンカーが 800mm 間隔に取付けられている。RC 床版厚さは 170mm、アスファルト舗装厚さは 75mm である。本橋梁では RC 床版の損傷、対傾構取り付け部の疲労亀裂

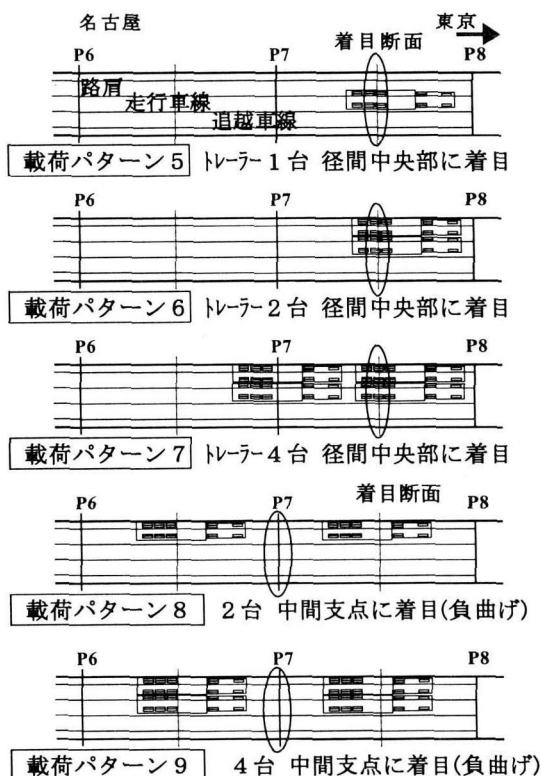


図-5 坂部高架橋荷重試験車両配置

等が確認されている。

3. 実橋荷重試験

ここでは上述の既存非合成桁橋梁 2 橋において実際に設計荷重に相当する荷重を行い、実橋梁の挙動を観察した。

実橋荷重試験における荷重は正曲げ、および負曲げについて着目断面を決めて、対象橋梁の設計活荷重を基準に設定した曲げモーメントを発生させた。しかしながら供用中の実橋に対し、分布荷重である L 荷重を実際に載荷することは、荷重の大きさ、載荷方法などの面から困難であることから、本研究では図-3 に示すように、複数のトラックを用いて輪荷重載荷を行い、挙動を観察することとした。

着目断面は設計活荷重で発生する正曲げモーメントが中央径間のものより側径間のものが大きいことから、側径間中央断面を着目断面とした。負曲げモーメントについても同様の理由により側径間の中間支点を着目断面とした。

荷重は図-4、5 に示す 9 つの載荷パターンにより検討をおこなった。載荷パターン 1～3、パターン 5～7、はおおの箒川橋、および坂部高架橋の正曲げモーメントに対する検討、パターン 4、パターン 8、9 は負曲げに関する検討に用いる。

表-1 に設計に用いられる計算法より求めたたわみ、および曲げモーメントを示す。詳細は文献 10) を参照され

表-1 格子桁計算によるたわみと曲げモーメント

第川橋	径間P3-A2 中央 たわみ [mm]	着目断面曲げモーメントの L20に対する割合[%]
L20	-64.5	100
L25	-85.1	132* 119**
載荷パターン1	-50.1	78
載荷パターン2	-70.8	83
載荷パターン3	-119.9	179
載荷パターン4	-39.7	133
坂部高架橋	径間P7-P8中央 たわみ [mm]	着目断面曲げモーメントの L20に対する割合[%]
L20	-15.0	100
L25	-16.9	105* 113**
載荷パターン5	-9.2	66
載荷パターン6	-27.7	188
載荷パターン7	-25.9	181
載荷パターン8	-10.9	94
載荷パターン9	-16.3	141

*径間中央の値 **中間支点での値

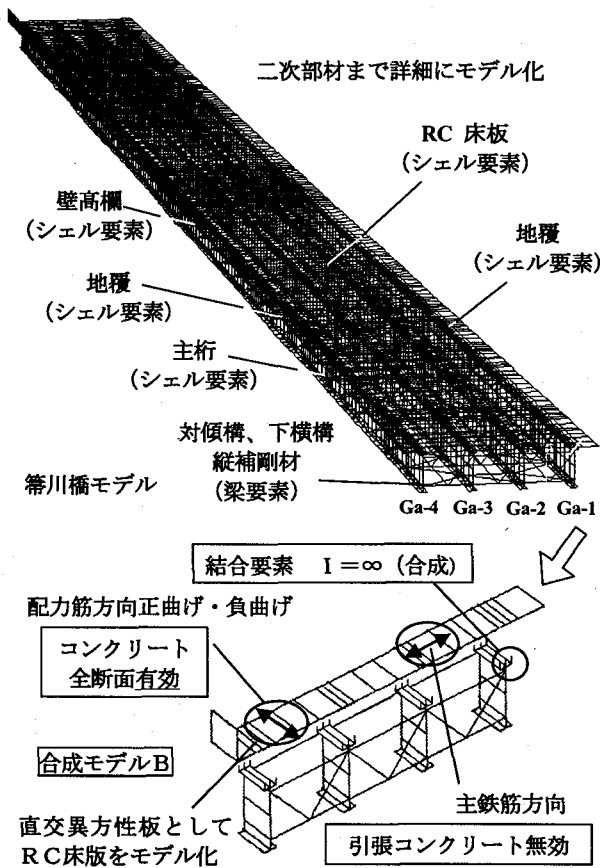
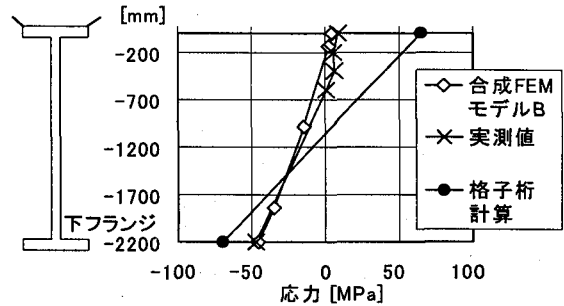


図-6 検討に用いたFEMモデルの概要

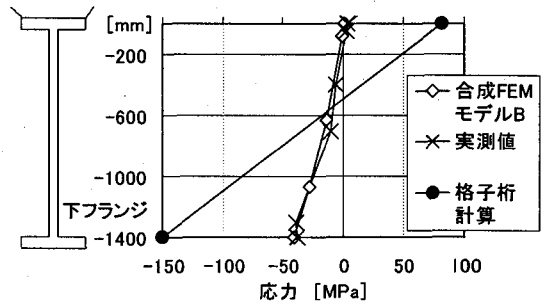
たい。これより、設計計算上パターン3,4,6,7,9は、設計荷重を上回る載荷であることがわかる。しかし、実際には設計計算値を大幅に下回るたわみ、応力等が測定された。これらのことから、既設の非合成桁橋梁は設計荷重以上の耐荷力を有していることは明らかである。

4. 実橋の載荷試験荷重のFEM解析による評価

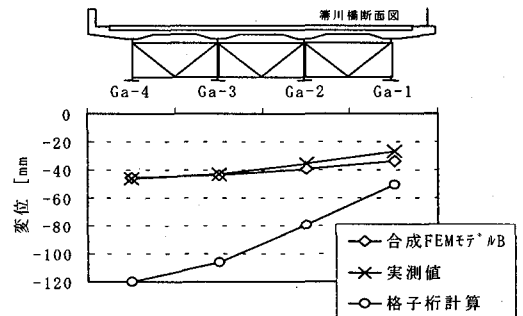
現有する実耐荷力を評価するためには実橋の挙動を正



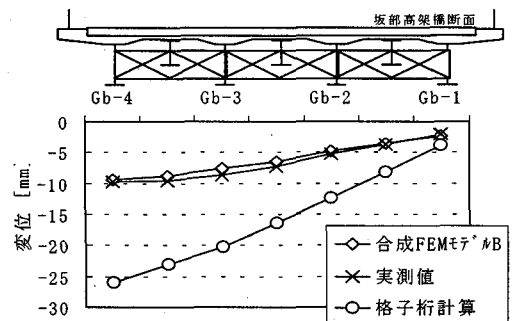
(a) 載荷パターン4 第川橋支点P3付近



(b) 載荷パターン7 坂部高架橋支点P7付近



(c) 載荷パターン3 第川橋径間P3-A2 中央



(d) 載荷パターン7 坂部高架橋P7-P8 中央

図-7 主桁着目断面活荷重応力およびたわみ

しく評価できるモデルが必要である。そこで本研究では文献 10) の中で構築したFEMモデルを用いて対象橋梁の実耐荷力の評価を行う。その概要を図-6に示す。文献 10) の合成FEMモデルBであり、ここでは汎用FEM解析プログラムMARC, K6.2¹³⁾を用い解析を行った。解析から求めた着目桁の活荷重応力と実測値の比較の例を図-7 (a), (b)に、たわみの実測値との比較を図-7 (c), (d)に示す。応力、たわみともに解析値は実測値と良く一

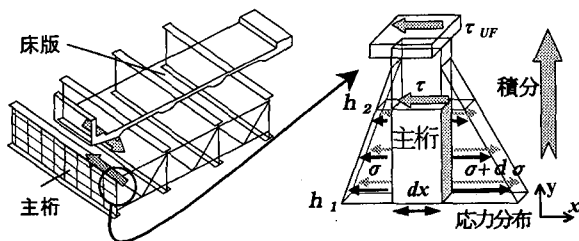


図-8 床版 - 上フランジ間のせん断応力

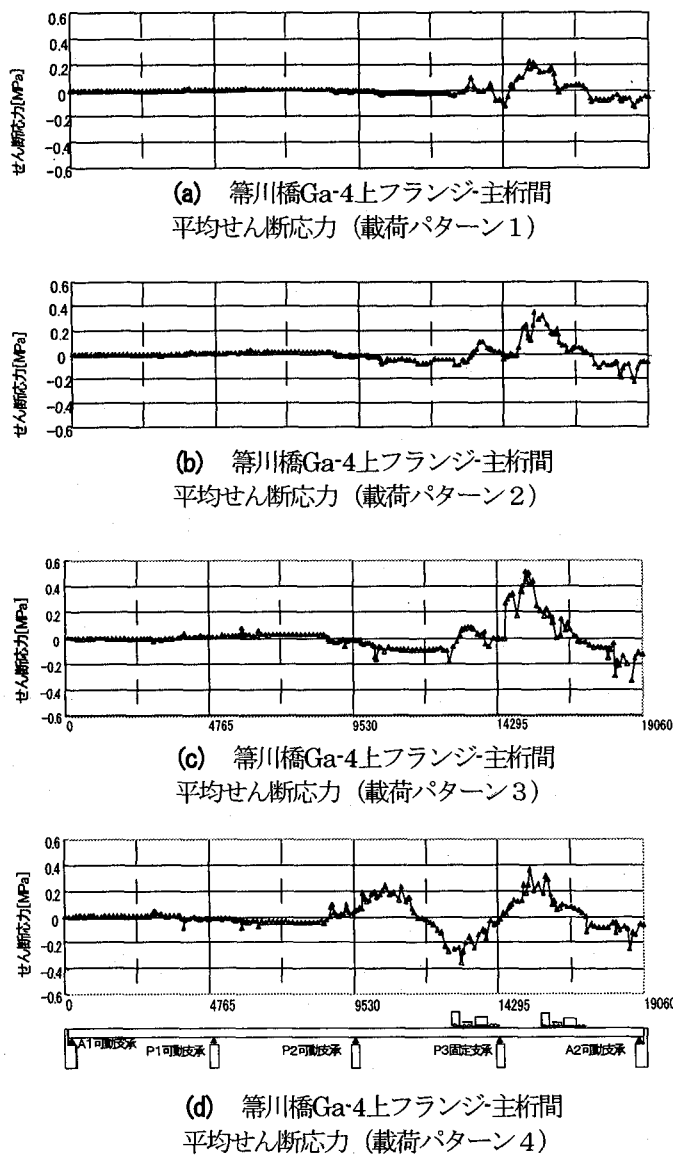


図-9 フランジ主桁間平均せん断応力1

致していることがわかる。

ここで構築したFEMモデルの要素数は第川橋で14,027、坂部高架橋で8,209である。床版、および主桁はシェル要素で構成され、RC床版と上フランジを表現するシェル要素間を剛体の梁要素で結合することにより合成桁を表現する。各部材の諸元、材料定数等は設計計算書に記載のものを用いた。各主桁はフランジ幅、厚さ、断面変化を実物に則して詳細に再現している。また対傾構、

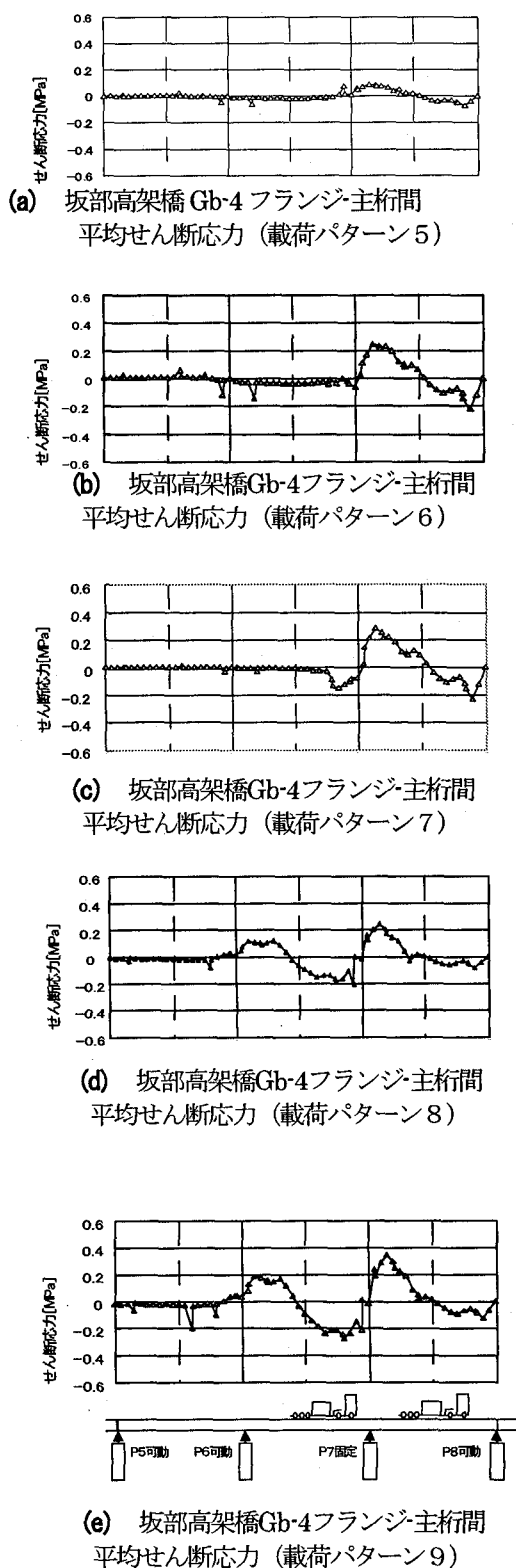


図-10 フランジ主桁間平均せん断応力2

下横構、支点部垂直補剛材等の2次部材もモデル化を行った。これらに加えて全体の挙動に影響を及ぼすと考えられる地覆および壁高欄もFEMモデルに取込んだ。また、上述の設計計算との比較を行うために鋼とコンクリートとの弾性係数比 n を設計計算書と同じ10とした。

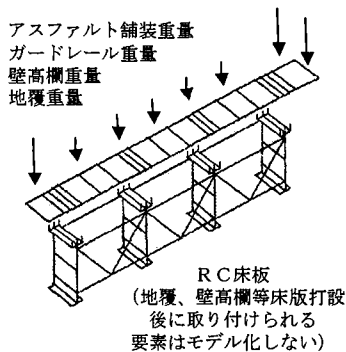


図-11 後死荷重モデル

表-2 直応力による実耐荷力指標 A

実耐荷力指標 A	側径間中央 下フランジ	中間支点 下フランジ
箒川橋	2.1	4.1
坂部高架橋	3.8	3.9

なお、アスファルト舗装は床版の剛性に対して影響は少ないとの結果から¹⁴⁾ここでは考慮していない。床版は直交異方性版としてモデル化を行った。これらは載荷試験における活荷重たわみの実測値、及び中間支点付近の主桁応力分布より、橋軸直角方向の荷重分配および、中立軸の位置を実測値と比較し、橋軸直角方向については、引張を受けるコンクリート断面を無効として剛性を求めた。対して橋軸方向については全断面のコンクリートを有効として断面係数を計算して剛性を計算した。モデル化の差異による解の変化等は文献 10) を参照されたい。

5. 実橋載荷試験の活荷重で床版と主桁上フランジ間で発生したせん断応力

ここでは上述の実橋載荷試験で床版と上フランジ間で発生したせん断応力を求める。本研究の FEM モデルではシェル要素とした床版と上フランジとを梁要素で結合しているが、床版とフランジ間で発生するせん断応力を直接的に求めることはできなかった。せん断力の分布を求めるために床版および上フランジをソリッド要素等とすること、あるいは特殊要素を用いること等が考えられるが^{15)~17)}、汎用性と計算機の容量から現実的ではない。そこで本研究では図-8に示すように間接的に床版-フランジ間のせん断力を求めることを試みた。本研究で着目すべき断面は鋼桁と床版との接合面であることから、着目断面以下の部分で釣り合い式を立て、共役のせん断力を求めることとした。この方法では鋼桁断面のみの応力を考えることより、明快に上フランジ上のせん断応力をもとめることができる。また床版の有効幅を考える必要がない。本 FEM モデルでは主桁は縦方向にも要素分割されていることから FEM モデルの解を用いて主桁応力分布を求めて積分し、上フランジ面で発生するせん断応力を求めた。また、この計算を行う事前に簡単なモデル

により正しいせん断応力が計算できることを確認した。しかし FEM モデルのメッシュ分割が粗くなっているところ、あるいはせん断応力が変化するところでは値がばらついた。

実橋載荷試験について計算したものを図-9(a)~(d)、図-10(a)~(d)に示す。解析結果からは橋軸方向のせん断応力の分布は載荷点、支点などで矩形的に変化するものではなく、滑らかに変化することがわかる。そして発生するせん断応力は載荷を行った径間以外では非常に小さい。また、中間支点付近で発生するせん断応力は支点を境界に急変するものではなく、ある程度の範囲を持って緩やかに変化していることがわかる。そしてこれらは着目した側径間の中央から中間支点の間でもっとも大きくなっていることがわかる。しかし全ての載荷パターンで発生する活荷重によるせん断応力は、ピーク値で箒川橋では 0.5MPa 程度、坂部高架橋では 0.4MPa 程度であった。

ここで示したせん断応力分布は活荷重応力によるものであり、耐荷力に関する評価は次章で FEM モデルより求めた死荷重応力を加えて行う。

6. 実耐荷力の評価

対象橋梁の現有する実耐荷力を評価するには活荷重で発生する応力のみならず、死荷重で発生するもの、およびコンクリートの乾燥収縮、クリープ等の影響をあわせて許容応力と比較する必要がある。しかしここでは対象橋梁が竣工より30年もの年月を経ていることから、乾燥収縮、クリープ等のコンクリートの材料的な性質により生じる応力については含まないこととした。ここでは死荷重を、施工手順を考えて床版硬化前に生じるものおよび後で生じるものに分け、各々前死荷重、後死荷重と定義し以降用いる。死荷重により床版と上フランジ間で生じるせん断応力は後死荷重によるものである。これを求める FEM モデルは図-11に示すように壁高欄は無く、RC床版厚には地覆分を含んでいない。このモデルに舗装、ガードレール、地覆、壁高欄の重量を載荷荷重としてせん断応力を求めた。

これらを用いて対象橋梁が現行の B 活荷重¹⁸⁾に対してどの程度の載荷能力を有しているかを評価することを試みる。FEM より B 活荷重載荷をシミュレートして、対象橋梁の着目断面に実際に生じるであろう応力を求める。そして、許容応力から死荷重分を引いた活荷重として載荷可能な応力範囲が、B 活荷重の載荷で生じる応力の何倍かを以下の式(1)で表し、実耐荷力指標とする。

$$A = (\sigma_a - \sigma_{dead}) / \sigma_{BLL} \quad (1)$$

ここで A : 実耐荷力指標
 σ_a : 示方書に定められる許容応力
 σ_{dead} : 前後死荷重による応力
 σ_{BLL} : B 活荷重で発生する応力

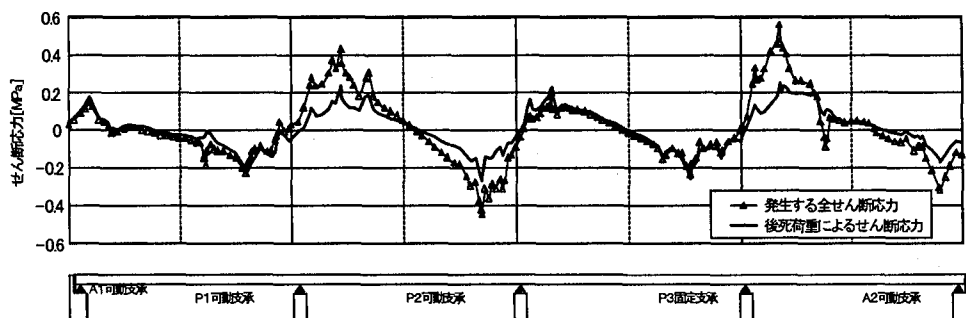


図-12 第川橋Ga-4上フランジ主桁間
平均全せん断応力 (B 活荷重, P3 着目)

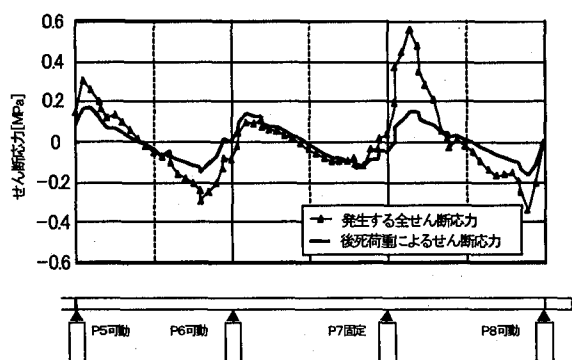


図-13 坂部高架橋Gb-4上フランジ主桁間
平均全せん断応力 (B 活荷重, P7 着目)

はじめに対象橋梁の2着目点における直応力による評価を表-2に示す。先のFEM解析より着目断面に関するB活荷重載荷で発生する応力、および前後死荷重による応力を求めて算出したものである。実耐荷力指標の値は2~4程度となり、合成桁橋梁とみなすと対象橋梁は直応力では正曲げによる側径間中央の下フランジをクリティカルポイントとして、B活荷重に対して2倍程度の載荷で着目点の応力が示方書に定められる許容応力に達することを示している。ただし、主桁の応力分布が設計と異なる為、座屈補強の効果に対する検討等が必要であると考え。また支承、橋脚等の耐荷力についての検討も必要であり、実際の終局状態を論じるには不十分であると考え。

次にせん断応力に関して評価を行う。ここでは中間支点上のせん断応力が最大となるB活荷重の載荷パターンより、生じる床版と上フランジとの間のせん断応力に死荷重によるものを加えて図-12、13に示す。発生した最大の全せん断応力は支間長の短い坂部高架橋の方が大きく、0.5~0.6MPa程度という結果を得た。

床版と上フランジとの結合のせん断応力に対する抵抗力は筆者らが文献11)の中で扱った実験的検討の結果より付着のみで0.5MPa程度、スラブアンカーと付着とでは0.8MPa程度であったこと、および、直応力による評価で用いた許容応力には道路橋示方書に定められた安全率が

含まれていることから考えると対象橋梁を合成桁橋梁として扱う場合には直応力による限界より先に床版と主桁上フランジとの結合の限界が先に生じてしまう可能性が大きいと考えられる。ただし、文献11)の中では床版の自重等によるせん断抵抗の増加⁹⁾などは考慮していない。

ここでせん断応力の橋軸方向分布に着目すると、最大のせん断応力が発生する場所が支点上と大きく異なる。また、死荷重で発生するせん断応力と活荷重で発生するせん断応力の割合に着目すると、死荷重によるせん断応力は設計活荷重レベルの載荷で発生するせん断応力と同レベルであることがわかる。ただし、先に述べたようにここでの死荷重によるせん断応力にはコンクリートの乾燥収縮、クリープ等の影響が考えられることから、死荷重によるせん断応力を加えて実耐荷力を評価することについては、更に詳細な検討が必要であると考え。

7. 結論

本研究では2橋の既存非合成橋梁に設計荷重レベルの載荷試験を行い、そこで床版と主桁上フランジ間で発生するせん断応力を求め、実耐荷力を評価することを試みたものである。本研究で得られた成果を要約すると以下のようなになる。

- (1) 対象とした2既存非合成連続桁橋梁の実橋載荷試験で生じたRC床版と上フランジ間で生じるせん断応力の分布は、載荷点、支点などで矩形的に変化するものではなく、滑らかに変化する。また、設計荷重レベルの載荷で生じる活荷重による最大せん断応力は0.5MPa程度である。
- (2) 既設非合成桁橋梁を合成桁橋梁とみなして扱った場合には、死荷重を含めた直応力に対してはB活荷重の2倍程度、活荷重載荷に対する余力があると考えられるが、RC床版と上フランジとの結合が先に破壊する可能性がある。
- (3) 死荷重により発生するせん断応力は設計活荷重レベルの載荷により発生するせん断応力に等しいと考えられる。

謝辞: 第川橋の実橋測定を担当していただいた(株)フジエ

エンジニアリングの関係者各位、坂部高架橋の実橋測定を担当していただいた(社)建設機械化研究所の関係者各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 多田安夫, 中村正平, 篠原洋司: 活荷重合成ゲタ橋の大型模型実験, 土木研究所報告, No.116, Vol.4, 1962.1
- 2) 藤原 稔, 村越 潤, 鹿嶋久義: 鋼プレートガーダー橋における応力測定結果に関する報告, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1181-1188, 1991.3
- 3) 新延泰生, 矢島基臣, 菅原 莊: 実測たわみに基づく橋桁の剛性評価に関する研究, 土木学会論文集, No.435/VI-15 pp.35-41, 1991.9
- 4) 高橋昭一, 志村 勉, 橋 吉宏, 小西哲司: PC床版2主桁橋「ホロナイ川橋」の設計および解析・試験検討, 橋梁と基礎, pp.23-30, 1994.2
- 5) 三木千壽: 鋼橋の技術開発, 橋梁と基礎, 1997.8
- 6) 高幡智孝: 上面増厚工法により床版を補強した既存橋の補強効果, 長大技報, No.6, pp.20-33, 1997.9
- 7) Miki, C., Toyofuku, T., Yoshimura, Y., Murakoshi, J.: Stress Reduction Factor for Fatigue Assessment of Highway Bridges, Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng., No.386/I-8, pp.341s-349s, 1987.10
- 8) 中島章典, 溝江慶久, 廣田 篤, 吉原知佳, 西園広之, 大江浩一: 押抜きおよび桁試験によるスラブ止めの水平せん断ずれ性状と疲労強度の検討, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1505-1514, 1998.3
- 9) 依田照彦, 中洲啓太: 鋼とコンクリートの接合構造の新技术, 第1回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, pp.73-80, 1998.8
- 10) 三木千壽, 山田真幸, 長江 進, 西 浩嗣: 既設非合成連続桁橋の活荷重応答の実態とその評価, 土木学会論文集, No.647/I-51 pp.281-294, 2000.4
- 11) 山田真幸, Satorn PENGPHON, 三木千壽, 市川篤司, 入部孝夫: RC床版と鋼フランジ間の付着とスラブアンカーによるせん断抵抗の評価, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1161-1168, 2001.3
- 12) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 1980
- 13) MARC Analysis Research Corporation: Rev. 6.0 VOLUME A~E, 1994
- 14) 黒田充紀, 永井真嗣, 藤野陽三, 柄川伸一, 川井 豊: 並列 I 桁橋の有限要素モデル化に関する検討, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.1073-1080, 1996.3
- 15) Newmark, N.M., Siess, C.P., and Viest, I.M.: Test and analysis of composite beams with incomplete interaction, Proceedings of Society for Experimental Stress Analysis, Vol.9, No.1, pp.75-92, 1951
- 16) 浜田純夫, 有住康則: 不完全合成桁の有限要素解析, 土木学会論文報告集, No.265, pp.1-9, 1977.9
- 17) 小松定夫, 佐々木 孝: 不完全合成格子桁橋の理論と近似計算法について, 土木学会論文報告集, No.329, pp.27-37, 1983.1
- 18) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 1996
- 19) 榊田智子, 平城弘一, 渡辺 晃, 高田嘉秀, 宮地真一, 牛島祥貴: スラブアンカーの静的ずれ耐荷力特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1373-1380, 2001.3

(2001年9月14日受付)